

文章编号 1004-924X(2017)12-3056-07

多共振峰圆形光栅滤波器

王永进*, 秦 川, 高绪敏, 张锋华

(南京邮电大学 Peter Grünberg 研究中心, 江苏 南京 210003)

摘要:提出了一种导模共振圆形光栅滤波器,以实现它在可见光范围内的多波段滤波。理论分析了圆形光栅滤波器在同一入射波偏振条件下形成多个共振峰的原因。通过微纳加工技术在硅基二氧化铪材料上实现了光栅层约为 70 nm 的圆形光栅薄膜结构。利用一维线性光栅对圆形光栅的反射谱进行了模拟,通过角分辨微纳反射谱测试系统获得了该光栅滤波器在不同入射波偏振条件以及不同入射角时的反射谱。实验表明,在特定的光栅周期以及占空比条件下(如光栅周期 350 nm,占空比 0.5),当线性偏振光正入射时,该圆形光栅滤波器形成了两个共振峰(505 nm 处和 575 nm 处),与模拟结果基本符合。另外,光栅占空比相同时,随着光栅周期的增加,共振峰会向较长的波段偏移。实验显示:通过设计不同结构的亚波长圆形光栅,可以实现可见光范围内多个特定波段的滤波作用。

关键词:衍射光栅;亚波长结构;微纳加工;导模共振;光栅滤波器

中图分类号: O436.1; TN305.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172512.3056

Circular grating filters with multiple resonant peaks

WANG Yong-jin*, QIN Chuan, GAO Xu-min, ZHANG Feng-hua

(Peter Grünberg Research Centre, Nanjing University of Posts and
Telecommunications, Nanjing 210003, China)

* Corresponding author, E-mail: wangyj@njupt.edu.cn

Abstract: A guided mode resonant Circular Grating Filter (CGF) was proposed to realize its multiple band filter in the visible light regions. The reason for the formation of multiple resonance peaks in the CGF was analyzed theoretically under the polarization of the same incident beam. The freestanding CGFs with the thickness of 70 nm were realized on HfO₂-on-silicon by micro/nano machining technology. An 1D linear grating was used to simulate the reflection spectrum of the circular grating. By changing the polarization conditions and the incidence angle of incident beam, the reflection spectrum of CGF was experimentally obtained by using angular resolved micro reflectometry. Experimental results indicate that the CGF forms two resonant speaks (505 nm and 575 nm) in a specific grating period (350 nm) and a duty cycle (0.5) for the surface-normal linearly polarized incident beam. The result is in great agreement with the theoretical simulations. Furthermore, the resonance peaks will shift to longer bands with the increase of the grating period under the same duty cycle. It concludes that the filtering effect of multiple bands can be realized by designing different subwavelength gratings with different structures.

收稿日期:2017-05-23;修订日期:2017-06-19.

基金项目:南京邮电大学科研基金资助项目(No. KYZZ16-0256);国家重点研究发展计划资助项目(No. 2016YFE0118400);国家自然科学基金资助项目(No. 61322112, No. 61531166004)

Key words: diffraction grating; subwavelength structure; micro-nano machining; guided mode resonance; grating filter

1 引言

亚波长结构的光学器件具有独特的光学性质,可以制作性能优越的全反射元件、抗反射元件、滤波器等。亚波长结构代表着微纳加工和光学结合的一个全新领域的诞生。由于光栅周期小于入射波长,亚波长光栅只存在零级衍射波,因此其计算模拟简单且衍射效率高^[1-6]。导模共振(Guided Mode Resonance, GMR)通常与介质薄膜结构和周期性亚波长图形相关联^[7]。基于导模共振的亚波长滤波器具有高效能、宽窄带以及低旁带等特点。当导模共振现象发生时,传播波的衍射效率发生明显变化。一些细微的物理参数的改变都能够造成这种变化,例如波长、周期性电介质薄膜厚度、入射角等。作为这个现象的重要应用,导模共振光栅滤波器数十年来一直备受关注^[8-10]。为了对光栅结构进行优化,实现不同功能,对导模光栅滤波器的光谱研究越来越深入,其中最重要的两个影响因素就是入射波的偏振状态和入射角度。以一维线性光栅为例,当正入射时,共振峰会产生简并现象,而在倾斜入射时,由于简并的消失,共振峰会发生分裂。此外,由于偏振敏感效应,不同入射偏振角下的导模共振发生在不同的波长处^[11-13]。

近年来,圆形光栅作为经典的二维结构在半导体激光器、光电探测器、光耦合器等相关领域有着广泛的应用。同时也可以根据导模共振效应通过设计和优化作为滤波器使用,对于导模共振滤波器的研究能够追溯到 20 世纪 90 年代。由于能够工作在不同波段,GMR 滤波器有带通(透射)和带阻(反射)两种^[14-16]。本文介绍了一种在硅基二氧化铪(HfO_2)材料上通过微纳加工形成的亚波长圆形光栅结构,它在线性偏振光正入射时具有多共振峰的特点,可以作为多波段光栅滤波器,基于严格耦合波分析法(Rigorous Coupled Wave Analysis, RCWA)用一维光栅对特定周期和占空比的圆形光栅进行线性模拟,实际测得的共振峰形成波段与模拟结果符合,通过改变圆形光栅的亚波长结构(光栅周期和占空比)实现了特定波段的滤波。

2 多共振峰形成原理及参数选定

对于一维线性光栅,由于其存在偏振敏感特性,当入射波的偏振状态改变时,导模共振现象发生在不同波长处。TE 或 TM 模式的线性偏振光正入射时,在特定波段只存在单一共振峰。而对于圆形光栅来说,可以将正入射线性偏振光的电场分解为两个正交分量, E_1 和 E_2 。

如图 1 所示,其中 E_1 是径向分量, E_2 是切向分量,两个分量平分入射光强,在同一入射光偏振条件下能够在特定波段不同波长处同时发生导模共振现象,所以该圆形光栅能够在任意线偏光正入射时形成多个反射峰^[16-17]。

本文所述的多共振峰圆形光栅滤波器包含 200 nm 的 HfO_2 层,分为光栅层和光波导层。图 2 为光线正入射线性 HfO_2 光栅时不同光栅厚度和不同波段的反射谱仿真图,可见当光栅厚度在 70 nm,光波导厚度在 130 nm 时,有助于获得低边带和窄线宽,因此该圆形光栅滤波器选择 70 nm 的光栅层,130 nm 的光波导层。

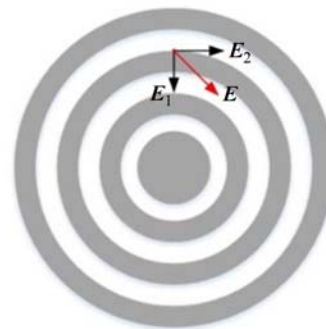


图 1 多共振峰形成原理

Fig. 1 Principle diagram of multiple resonance peaks

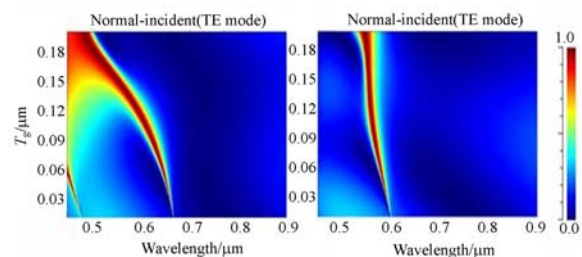


图 2 圆光栅反射谱仿真图

Fig. 2 Simulated reflectance spectra of circular grating

3 物理表征

3.1 实现方法

HfO_2 是一种常见的光学材料和半导体材料,近年来,我国对于 HfO_2 薄膜以及其离子束刻蚀特性的研究越来越深入^[18]。本文所述的圆形光栅通过实现 HfO_2 薄膜完成对可见光波段的滤波作用。硅基 HfO_2 材料包含 $200\ \mu\text{m}$ 的硅衬底层和通过蒸发法沉积在衬底层上 $200\ \text{nm}$ 的 HfO_2 层,如图 3(a)所示。

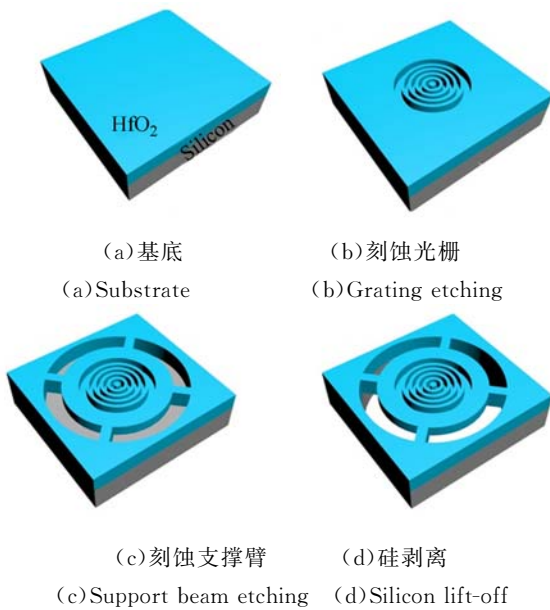


图 3 圆形光栅滤波器的制备流程

Fig. 3 Flow chart of circular grating filter fabrication

首先,通过电子束曝光(EEBL)在光刻胶掩模上定义出圆形光栅结构。之后,采用离子束刻蚀(IBE)的方法在 HfO_2 层上刻蚀出该结构,此时, $200\ \text{nm}$ 的外延层被分为厚 $70\ \text{nm}$ 的光栅层 T_g 和厚 $130\ \text{nm}$ 的 HfO_2 波导层 T_w 。随后,用离

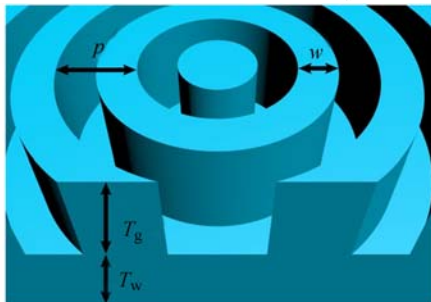


图 4 圆形光栅结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of circular gratings

子束进一步刻蚀波导层,形成支撑结构。(如图 3(c)所示)该支撑结构的作用是在 HfO_2 薄膜形成后,防止因应力释放对薄膜造成的损伤。最后,采用背后对准技术和深硅刻蚀完全去除波导层下方的硅,实现悬空薄膜 HfO_2 圆形光栅滤波器(见图 3(d))。

如图 4 所示, p 定义为光栅周期, w 定义为光栅脊的宽度,占空比 η 定义为光栅脊宽与光栅周期的比值 w/p 。

3.2 光栅形貌表征

由图 5 可以清楚的看出, HfO_2 波导层下方的硅衬底层已被完全移除,四个长 $40\ \mu\text{m}$,宽 $25\ \mu\text{m}$ 的长方形结构共同支撑起一个 $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ 的正方形 HfO_2 薄膜。薄膜上有两个周期分别为 $350\ \text{nm}$ 和 $400\ \text{nm}$ 、占空比均为 0.5 的圆形光栅结构且完全悬空。圆形光栅的具体结构由图 6 所示,图 6 是在扫描电镜下观察到的放大 3500 倍后的光栅结构图,可见其刻蚀效果基本达到了

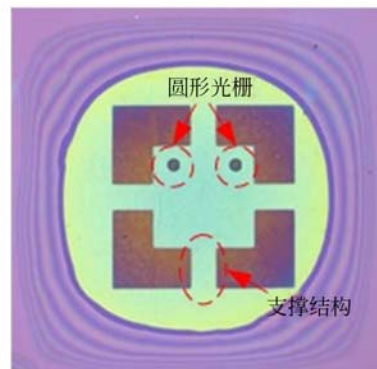


图 5 光学显微镜下的光栅形貌

Fig. 5 Optical microscope morphology of circular grating

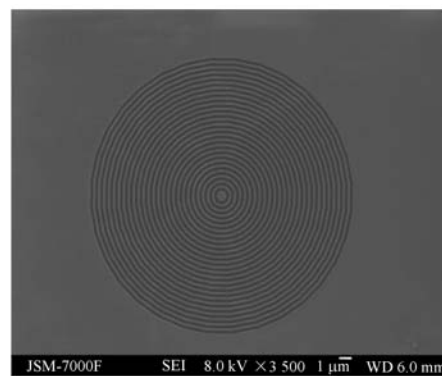


图 6 扫描电镜(SEM)下的光栅形貌

Fig. 6 Grating topography under Scanning Electron Microscopy (SEM)

预期要求。需要说明的是,刻蚀后形成的圆形沟槽具有一定的粗糙度,圆形光栅表面也并非是完全光滑的,这对于之后的实际测试会造成一定的影响,但不影响总体趋势。图中只出现了周期为 350 nm,占空比为 0.5 的圆形光栅形貌图,另一圆形光栅与它具有相似结构。此外,本课题组还制造了不同周期的圆形光栅,在此不一一赘述。

4 仿真模拟

对圆环结构直接通过时域有限差分法(Finite Difference Time Domain, FDTD)或有限单元法(Finite Element Method, FEM)进行三维建模和仿真,不仅计算过程需要花费大量时间,对于硬件的要求也十分高,几乎难以实现,而对于一维线性光栅的模拟则十分准确和迅速^[19-22]。经过理论和实验证实,“切向偏振光”(电场方向与圆形光栅相切)和“径向偏振光”(电场方向与圆形光栅垂直)入射圆形光栅,可以用 TE 偏振模式的线性偏振光(电场方向平行于线性光栅)和 TM 模式的线性偏振光(电场方向垂直于线性光栅)入射线性光栅进行线性模拟。也就是说,圆形光栅的反射谱模拟可以通过材料、周期、占空比均相同的线性光栅模拟来实现。

图 7 所示的黑色和红色曲线分别是通过 RCWA 计算出的 TM 模式和 TE 模式的线性偏振光正入射周期为 350 nm,占空比为 0.5 的线性光栅时的反射率模拟图,蓝色曲线是根据线性光栅的模拟结果线性叠加形成的圆形光栅的反射率模拟图(彩图见期刊电子版)。相较于线性光栅,在特

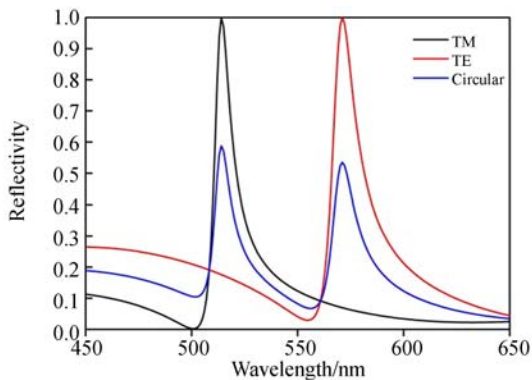


图 7 圆形光栅反射谱模拟图

Fig. 7 Simulation diagram of circular grating reflection spectrum

定波段,同一偏振角的线性偏振光正入射时产生了两个不同的共振峰。

5 实验测试

图 8 所示为角分辨测试系统的实际拍摄及组成图。如图所示,右侧的白光光源通过一根多模光纤连接至整个光路的起始点。透镜 1 与物镜 2 共焦面,透镜 2、透镜 3 与光阑 2 共焦面。透镜 1 后方的偏振片能够将入射光转换为线性偏振光照射至圆形光栅表面。光栅的反射光通过光路中的分束镜 1 和分束镜 2 被 CCD 所捕获,呈现出直径为 $10 \mu\text{m}$ 的光斑。通过三维载物台可以调整光斑在光栅表面的位置,待确定好光斑位置后,移除分束镜 2 将光路导引至光谱仪(Ocean Optics USB2000)处对光谱进行分析处理,光谱仪的底座安装有步进马达,可以实现精确的横向移动。

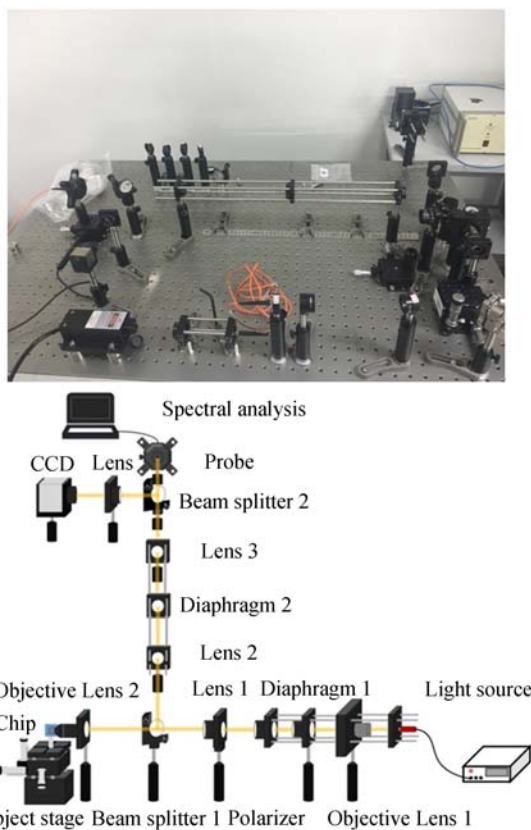


图 8 角分辨微纳反射谱测试系统

Fig. 8 Angular resolved micro-reflectance system

通过角分辨微纳反射谱测试系统对圆形光栅的反射率进行实际测量,结果如图 9 所示。图中所示为圆形光栅反射率随波长和线性偏振光入射

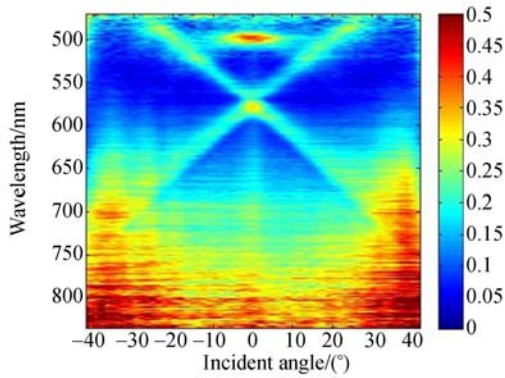


图 9 圆形光栅反射谱

Fig. 9 Reflectance spectrum of circular grating

角的变化情况,深蓝色表示反射率较低区域,深红色表示反射率较高区域(彩图见期刊电子版)。该圆形光栅的周期 P 为 350 nm, 占空比 η 为 0.5。当线性偏振光正入射,即入射角为 0° 时,该圆形光栅在波长 505 nm 和 570 nm 处形成了两个反射率较高的共振峰。这与上述的模拟结果基本符合,同时也间接证明了用线性光栅对圆形光栅进行线性模拟的可行性。根据之前的模拟与分析,波长较长的共振峰是由切向分量 E_2 形成的,波长较短的共振峰是由径向分量 E_1 形成的。图 10(a)、10(b)和 10(c)分别是实验测得的当线性偏振光正入射时光栅周期 P 为 400, 450, 500 nm, 占空比 η 均为 0.5 时的反射谱,可见当圆形光栅的占空比相同,周期增加时,其共振峰会向较长波段移动(红移现象)。因此可以通过设计不同的亚波长圆形光栅结构来实现对特定多个波段的滤波。

如图 10(a)所示,正入射时,该圆形光栅滤波器在 560 nm 和 650 nm 处形成了两个反射率较

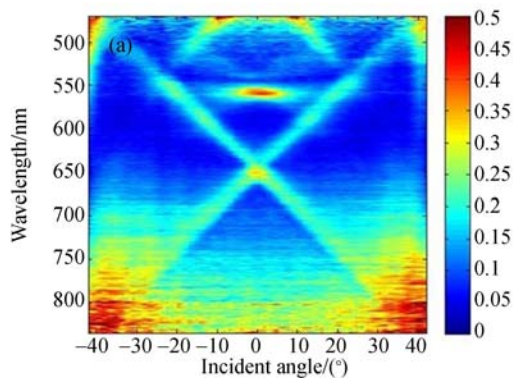
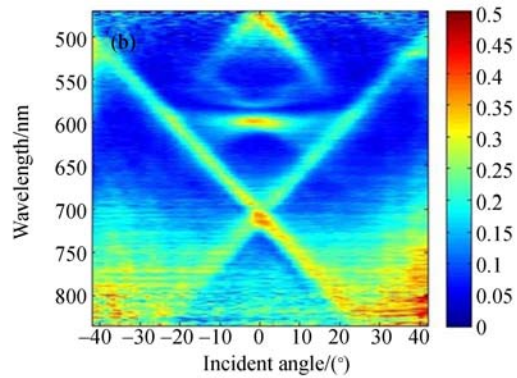
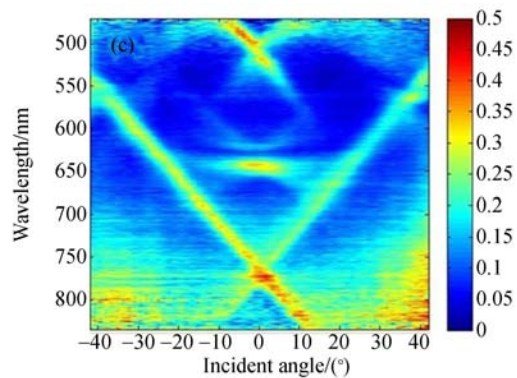
(a) $P=400$ nm(b) $P=450$ nm(c) $P=500$ nm

图 10 相同周期,不同占空比的圆形光栅反射谱

Fig. 10 Circular grating reflectance spectra with same period and different duty ratios

高的共振峰。由图 10(b)可以看出,光栅周期的增加使得共振峰红移至 600 nm 和 710 nm。同时,710 nm 处的共振峰较 600 nm 处有着较高的反射率。这一现象在图 10(c)中更加明显,且分别在 520, 650 和 760 nm 处形成了反射率较高的共振峰。

6 结 论

本文通过理论分析和模拟仿真研究了圆形光栅在特定波段内形成多个共振峰的原因,通过微纳加工技术在硅基 HfO_2 材料上实现了光栅层约为 70 nm 的圆形光栅薄膜结构。实验测得该结构的圆形光栅(周期为 350 nm, 占空比为 0.5)能够在 505 nm, 570 nm 形成两个共振峰,且随着光栅周期的变化,共振峰会产生红移现象。因此可以通过设计不同结构的圆形光栅实现可见光范围内多个波长的圆形光栅滤波器。

参考文献:

- [1] 李业, 张大伟, 王琦, 等. 亚波长导模共振滤波器的研究概况[J]. 光学仪器, 2016, 38(2): 185-188. LI Y, ZHANG D W, WANG Q, *et al.*. Research progress of sub-wavelength guided-mode resonant filter[J]. *Optical Instruments*, 2016, 38(2): 185-188. (in Chinese)
- [2] 桑田, 王占山, 吴永刚, 等. 亚波长介质光栅导模共振研究[J]. 光子学报, 2006, 35(5): 641-645. SANG T, WANG ZH SH, WU Y G, *et al.*. Re-search on guide-mode resonance for sub-wavelength dielectric grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(5): 641-645. (in Chinese)
- [3] DUAN X F, ZHOU G R, HUANG Y Q, *et al.*. Theoretical analysis and design guideline for focusing subwavelength gratings[J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 2639-2646.
- [4] GAO X M, SHI ZH, LI X, *et al.*. Multiline resonant filters fashioned with different periodic sub-wavelength gratings[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(23): 6660-6663.
- [5] FOLEY J M, PHILLIPS J D. Normal incidence narrowband transmission filtering capabilities using symmetry-protected modes of a subwavelength, dielectric grating[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(11): 2637-2640.
- [6] 曹召良, 卢振武, 李凤友, 等. 二维抗反射亚波长周期结构光栅的设计分析[J]. 光学精密工程, 2002, 10(6): 537-541. CAO ZH L, LU ZH W, LI F Y, *et al.*. Design consideration of two-dimensional anti-reflective sub-wavelength periodic gratings[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(6): 537-541. (in Chinese)
- [7] WANG W, GAO X M, FANG X J, *et al.*. Transmission properties of Fabry - PÉrot filter consisting of silicon-based high-contrast gratings[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(1): 1-14.
- [8] WANG W, ZHU G Y, LIU Q F, *et al.*. Angle- and polarization-dependent spectral characteristics of circular grating filters[J]. *Optics Express*, 2016, 24(10): 11033-11042.
- [9] LUO ZH Y, ZHANG G J, ZHU R D, *et al.*. Polarizing grating color filters with large acceptance angle and high transmittance[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(1): 70-76.
- [10] BUET X, DARAN E, BELHARET D, *et al.*. High angular tolerance and reflectivity with narrow bandwidth cavity-resonator-integrated guided-mode resonance filter[J]. *Optics Express*, 2012, 20(8): 9322-9327.
- [11] 郑煌晏, 胡芳仁. 可见光波段的窄带导模共振滤光片的设计[J]. 激光技术, 2016, 40(1): 118-121. ZHENG H Y, HU F R. Design of narrowband guided-mode resonance filters in visible wavelength region[J]. *Laser Technology*, 2016, 40(1): 118-121. (in Chinese)
- [12] KINTAKA K, MAJIMA T, HATANAKA K, *et al.*. Polarization-independent guided-mode resonance filter with cross-integrated waveguide resonators[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(15): 3264-3266.
- [13] DUAN X F, HUANG Y Q, REN X M, *et al.*. High-efficiency InGaAs/InP photodetector incorporating SOI-based concentric circular subwavelength gratings[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(10): 863-865.
- [14] MA CH L, HUANG Y Q, REN X M. High-numerical-aperture high-reflectivity focusing reflectors using concentric circular high-contrast gratings[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(4): 973-978.
- [15] WANG ZH H. Influence of duty cycle on resonant wavelength in mode resonance filter[C]. *Shanghai Laser Society 2007 Annual Conference*, 2007: 213-230.
- [16] LERMAN G M, GRAJOWER M, YANAI A, *et al.*. Light transmission through a circular metallic grating under broadband radial and azimuthal polarization illumination[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(20): 3972-3974.
- [17] DUAN X F, ZHOU G R, HUANG Y Q, *et al.*. Theoretical analysis and design guideline for focusing subwavelength gratings[J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 2639-2646.
- [18] 王旭迪, 徐向东, 刘颖, 等. HfO₂ 薄膜的离子束刻蚀特性研究[J]. 光学精密工程, 2004, 12(5): 454-458. WANG X D, XU X D, LIU Y, *et al.*. Ion beam etching of HfO₂ film[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(5): 454-458. (in Chinese)
- [19] MAGNUSSON R. Spectrally dense comb-like filters fashioned with thick guided-mode resonant gratings[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(18): 3792-3794.

- [20] NIRLAULA M, YOON J W, MAGNUSSON R. Mode-coupling mechanisms of resonant transmission filters[J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 25817-25829.
- [21] FEHREMBACH A L, GAUTHIER-LAFAYE O, YU K C S, *et al.*. Measurement and modeling of 2D hexagonal resonant-grating filter performance [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2010, 27(7): 1535-1540.
- [22] PARK C H, YOON Y T, LEE S S. Polarization-independent visible wavelength filter incorporating a symmetric metal-dielectric resonant structure [J]. *Optics Express*, 2012, 20(21): 23769-23777.

作者简介:



王永进(1977—),男,江苏徐州人,博士,教授,2005年于中科院上海微系统与信息技术研究所获得博士学位,先后在德国弗莱堡大学、日本东北大学和德国于利希研究中心从事科研工作,主要从事可见光通信和光传感方面的研究。
E-mail: wangyj@njupt.edu.cn



秦川(1993—),男,江苏南京人,硕士研究生,2016年于南京邮电大学电子科学与工程学院获得学士学位,主要从事光学微纳器件的设计和加工。E-mail: qckagome@126.com.

(本栏目编辑:曹金)